

ANALISIS KARAKTERISTIK ATAP PELAT BESI SEBAGAI PERISAI MEDAN MAGNET DI BAWAH SALURAN TRANSMISI

Hendro Tjahjono ^{1,2}

1. Pusat Pengembangan Teknologi Keselamatan Nuklir – BATAN
Kawasan Puspiptek Serpong, Tangerang –15310
e-mail: hendrotj@centrin.net.id
2. Fakultas Teknologi Industri – Universitas Gunadarma

Abstrak

Dengan semakin terbatasnya lahan di daerah perkotaan yang padat, sangat terbuka kemungkinan untuk dimanfaatkannya daerah di bawah saluran transmisi, yang sebelumnya dibiarkan kosong, untuk keperluan industri, pergudangan atau keperluan lain yang melibatkan kehadiran manusia di daerah tersebut. Untuk itu, kualitas keselamatan dari saluran maupun individu di sekitarnya harus lebih ditingkatkan, termasuk keselamatan terhadap intensitas medan magnet di sekitar saluran tersebut. Sebagai salah satu solusi alternatif adalah dengan menggunakan bahan berpermeabilitas magnetik tinggi seperti besi sebagai perisai medan magnet, yang sekaligus juga bisa difungsikan sebagai atap bangunan. Untuk mengetahui karakteristik dari atap pelat besi dalam meredam intensitas medan magnet di bawah saluran transmisi tersebut, telah dilakukan analisis atau simulasi numerik melalui rekayasa perangkat lunak dengan menggunakan bahasa pemrograman Matlab. Sebagai saluran acuan adalah saluran transmisi 3 fasa konfigurasi horisontal 500 kV dengan amplitudo arus nominal 2500 A. Pengaruh dari tebal pelat, lebar dan tinggi atap serta permeabilitas bahan terhadap intensitas medan magnet di permukaan tanah telah dipelajari. Hasil analisis menunjukkan bahwa atap bangunan dari bahan pelat besi tersebut telah mampu meredam secara signifikan intensitas medan magnet yang diterima di permukaan tanah. Sebagai ilustrasi, pelat besi dengan permeabilitas relatif sebesar 5000, ketebalan 2 mm dan lebar 40 m yang diletakkan pada ketinggian 10 m telah mampu meredam intensitas medan magnet sekitar 55%. Pengaruh ketinggian dan lebar atap pelat juga cukup signifikan, dimana semakin lebar atap pelat dan semakin tinggi posisinya (semakin dekat ke kawat), intensitas medan magnet di permukaan tanah akan semakin rendah.

Kata kunci: analisis, shielding, medan magnet, pelat besi.

1. Pendahuluan

Dengan semakin terbatasnya lahan di daerah perkotaan yang padat, sangat terbuka kemungkinan untuk dimanfaatkannya daerah di bawah saluran transmisi, yang sebelumnya dibiarkan kosong, untuk keperluan industri, pergudangan atau keperluan lain yang melibatkan kehadiran manusia di daerah tersebut. Untuk itu, kualitas keselamatan dari saluran maupun individu di sekitarnya harus lebih ditingkatkan, termasuk keselamatan terhadap intensitas medan magnet di sekitar saluran tersebut. Sebagai salah satu alternatif adalah dengan menggunakan bahan berpermeabilitas magnetik tinggi seperti besi sebagai perisai medan magnet, yang sekaligus juga bisa difungsikan sebagai atap bangunan. Sebagai bahan pertimbangan dalam perancangan, perlu diketahui karakteristik pelat besi tersebut dalam meredam intensitas medan magnet di bawah saluran transmisi. Karakteristik tersebut mencakup sejauh mana berkurangnya intensitas medan magnet di permukaan tanah sebagai fungsi ketebalan pelat, ketinggian pelat (atap), lebar pelat dan permeabilitas bahan (besi) yang digunakan. Permeabilitas magnetik dari tanah dan lebar dari atap juga dianalisis untuk melihat gambaran pengaruhnya.

Sebagai acuan dalam analisis, diambil saluran transmisi tegangan ekstra tinggi (500 kV) dalam jaringan transmisi Jawa Barat, dengan amplitudo arus fasa nominal sebesar 2500 A. Konfigurasi saluran adalah horisontal dengan jarak antar kawat fasa sebesar 12 m dan tinggi kawat

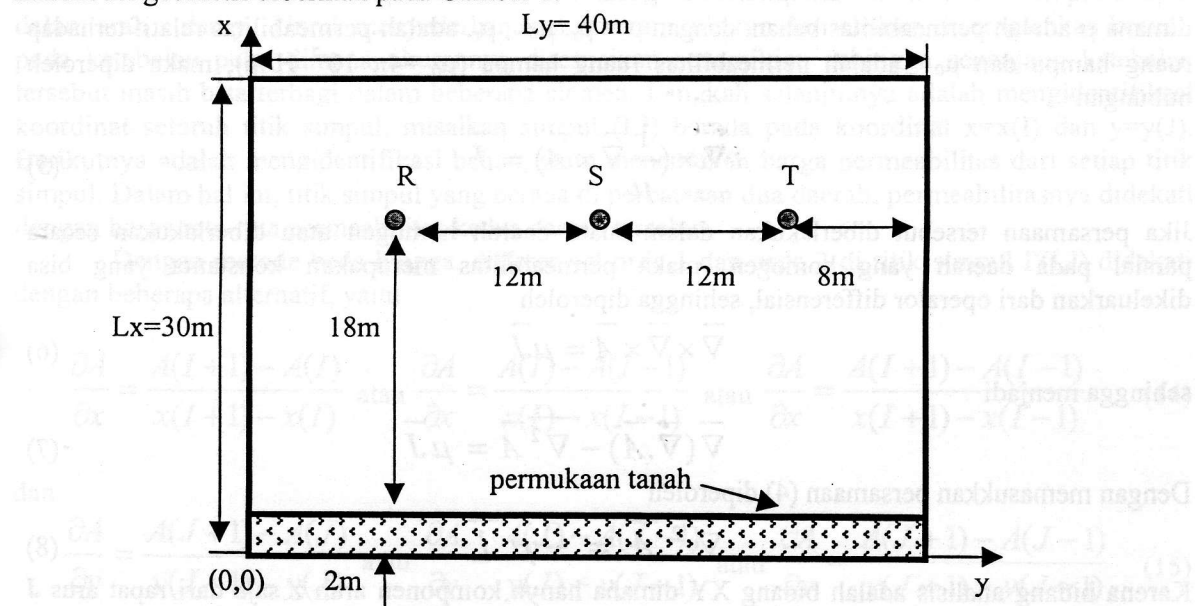
fasa pada posisi terendah (pada andongan) adalah sebesar 18 m. Bundel kawat fasa terdiri dari 4 kawat yang membentuk susunan persegi dengan jarak antar kawat sekitar 0,4 m.

Metode yang digunakan dalam analisis ini adalah dengan terlebih dahulu menyusun suatu program analisis medan magnet yang berlaku untuk daerah tak beraturan dan non homogen. Program disusun dengan menggunakan bahasa pemrograman Matlab versi 5.3, yaitu dengan memecahkan persamaan Poisson yang diturunkan dari persamaan Maxwell dimana vektor potensial magnetik A merupakan variabel. Dengan mengetahui distribusi dari vektor potensial magnetik di seluruh daerah yang dianalisis, rapat fluksi magnet B dapat dihitung, sehingga dapat dihitung pula intensitas atau kuat medan magnet H . Walaupun analisis dilakukan pada seluruh daerah, tetapi pengamatan lebih dikhususkan pada intensitas medan magnet di dekat permukaan tanah sesuai dengan kepentingan keselamatan individu di permukaan tersebut. Sebagai variabel utama yang dipelajari pengaruhnya terhadap intensitas medan magnet di permukaan tanah antara lain adalah permeabilitas magnetik dari bahan pelat (μ), tebal pelat, lebar atap pelat dan ketinggian atap pelat. Sedangkan pengaruh variabel lain seperti permeabilitas magnetik tanah dan sudut fasa arus juga dipelajari sebagai gambaran.

2. Pemodelan dan Analisis

2.1. Model geometri.

Geometri yang dipelajari dimodelkan sebagai suatu daerah 2 dimensi berbentuk persegi panjang dengan tinggi L_x (30 m) dalam arah vertikal dan lebar L_y (40 m) dalam arah horisontal. Daerah analisis tersebut mencakup ketiga kawat fasa (R, S dan T) dan sebagian tanah dengan ketebalan tertentu (ditetapkan sebesar 2 m) untuk mensimulasikan pengaruh tanah terhadap medan magnet di atasnya. Dalam arah horisontal, kawat fasa S diposisikan di tengah, sedangkan kawat R dan T di sebelah kiri dan kanannya dalam jarak yang sama. Walaupun masing-masing fasa terdiri dari 4 kawat, tetapi karena jarak antar kawat dalam satu fasa (0,4 m) masih jauh lebih kecil dibanding dengan jarak antar fasa (12 m), maka dalam analisis ini, setiap bundel kawat fasa dianggap sebagai satu titik simpul. Untuk pertimbangan keselamatan, jarak antara kawat fasa dengan tanah yang diambil adalah jarak terendah karena memberikan risiko yang terbesar. Skema dari model geometri diberikan pada Gambar 1.



Gambar 1. Skema model geometri

2.2. Model matematik.

Persamaan matematik yang dipecahkan dalam analisis ini diturunkan dari 2 persamaan Maxwell^[1,2], yaitu :

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{J} \quad (1)$$

dan

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (2)$$

dimana operator nabla $\vec{\nabla} = \frac{\partial}{\partial x} \vec{a}_x + \frac{\partial}{\partial y} \vec{a}_y + \frac{\partial}{\partial z} \vec{a}_z$

\vec{H} : vektor kuat medan magnet (A/m)

\vec{J} : vektor rapat arus listrik (A/m²), dengan $J=I/S$, dimana I adalah arus fasa dan S luas penampang kawat fasa.

\vec{B} : vektor rapat fluksi magnet (Tesla atau Weber/m²)

\vec{a}_x , \vec{a}_y dan \vec{a}_z : vektor satuan arah x , y dan z .

Dalam sistem tiga fasa, arus I terdiri dari arus fasa I_R , I_S dan I_T yang masing-masing merupakan arus bolak-balik sinusoidal dengan beda fasa 120° satu sama lain, sehingga jika $I_R = I_m \cdot \cos(\omega t)$, maka $I_S = I_m \cdot \cos(\omega t - 120^\circ)$ dan $I_T = I_m \cdot \cos(\omega t - 240^\circ)$, dimana I_m adalah arus puncak dan ω adalah kecepatan sudut (radian/detik), dengan $\omega = 2\pi \cdot f$, dimana f = frekuensi (Hz).

Dari persamaan (2), rapat fluksi \vec{B} dapat dinyatakan sebagai *curl* dari sembarang vektor, misalkan saja sebagai *curl* dari vektor \vec{A} , yang kemudian dinamakan sebagai vektor potensial magnetik, sehingga

$$\vec{B} = \vec{\nabla} \times \vec{A} \quad (3)$$

Karena hubungan tersebut berlaku untuk sembarang vektor \vec{A} , maka vektor \vec{A} juga dapat dipilih sedemikian sehingga memenuhi hubungan

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{A} = 0 \quad (4)$$

Berdasarkan hubungan

$$\vec{B} = \mu \cdot \vec{H} \quad \text{atau} \quad \vec{H} = \vec{B} / \mu$$

dimana μ adalah permeabilitas bahan, dengan $\mu = \mu_r \cdot \mu_0$, μ_r adalah permeabilitas relatif terhadap ruang hampa dan μ_0 adalah permeabilitas ruang hampa ($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m), maka diperoleh hubungan

$$\vec{\nabla} \times \left(\frac{1}{\mu} \vec{\nabla} \times \vec{A} \right) = \vec{J} \quad (5)$$

Jika persamaan tersebut diberlakukan dalam suatu daerah homogen atau diberlakukan secara parsial pada daerah yang homogen, maka permeabilitas merupakan konstanta yang bisa dikeluarkan dari operator differensial, sehingga diperoleh

$$\vec{\nabla} \times \vec{\nabla} \times \vec{A} = \mu \vec{J} \quad (6)$$

sehingga menjadi

$$\vec{\nabla} (\vec{\nabla} \cdot \vec{A}) - \vec{\nabla}^2 \vec{A} = \mu \vec{J} \quad (7)$$

Dengan memasukkan persamaan (4) diperoleh

$$\vec{\nabla}^2 \vec{A} = -\mu \vec{J} \quad (8)$$

Karena bidang analisis adalah bidang XY dimana hanya komponen arah z saja dari rapat arus \vec{J} yang ada, maka demikian halnya untuk vektor potensial \vec{A} , yaitu hanya komponen arah z saja yang ada, sehingga persamaan (8) menjadi

$$\nabla^2 A_z = -\mu J_z$$

atau

$$\frac{\partial^2 A_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A_z}{\partial y^2} = -\mu J_z \quad (9)$$

yang merupakan persamaan Poisson dengan variabel A_z . Persamaan inilah yang kemudian dipecahkan dengan metode numerik untuk mendapatkan distribusi vektor potensial magnetik di seluruh daerah analisis.

Selanjutnya, dengan menggunakan persamaan (3) dapat dihitung rapat fluksi magnet di seluruh daerah, dimana karena hanya A_z yang ada, maka diperoleh

$$B_x = \frac{\partial A_z}{\partial y} \quad \text{dan} \quad B_y = -\frac{\partial A_z}{\partial x} \quad (10)$$

Dan intensitas medan magnet H dapat dihitung dari hubungan

$$H_x = \frac{B_x}{\mu} \quad \text{dan} \quad H_y = \frac{B_y}{\mu} \quad (11)$$

Antara dua daerah dengan permeabilitas magnetik yang berbeda, misalkan antara daerah 1 dan 2, berlaku kondisi batas berikut

$$B_{n1} = B_{n2} \quad \text{dan} \quad \frac{B_{t1}}{\mu_1} = \frac{B_{t2}}{\mu_2} \quad (12)$$

sedangkan

$$\mu_1 H_{n1} = \mu_2 H_{n2} \quad \text{dan} \quad H_{t1} = H_{t2} \quad (13)$$

dimana indeks n menyatakan arah normal (tegak lurus) permukaan batas dan indeks t menyatakan arah tangensial (sejajar) permukaan batas.

2.3. Pemodelan numerik

Metode pendekatan numerik yang digunakan adalah metode beda hingga dua dimensi dalam koordinat kartesian [3]. Daerah analisis dibagi dalam elemen-elemen dan simpul-simpul dalam arah x dan y . Untuk menyederhanakan program, ukuran dari elemen diseragamkan kecuali pada ketebalan pelat dimana ukurannya disesuaikan sedemikian sehingga sepanjang ketebalan tersebut masih bisa terbagi dalam beberapa elemen. Langkah selanjutnya adalah mengidentifikasi koordinat seluruh titik simpul, misalkan simpul (I, J) berada pada koordinat $x=x(I)$ dan $y=y(J)$. Berikutnya adalah mengidentifikasi bahan, yaitu menentukan harga permeabilitas dari setiap titik simpul. Dalam hal ini, titik simpul yang berada di perbatasan dua daerah, permeabilitasnya didekati dengan harga rata-rata permeabilitas kedua daerah tersebut.

Dengan metode beda hingga, differensial orde 1 dan orde 2 di titik simpul $P(I, J)$ didekati dengan beberapa alternatif, yaitu

$$\frac{\partial A}{\partial x} = \frac{A(I+1) - A(I)}{x(I+1) - x(I)} \quad \text{atau} \quad \frac{\partial A}{\partial x} = \frac{A(I) - A(I-1)}{x(I) - x(I-1)} \quad \text{atau} \quad \frac{\partial A}{\partial x} = \frac{A(I+1) - A(I-1)}{x(I+1) - x(I-1)} \quad (14)$$

$$\frac{\partial A}{\partial y} = \frac{A(J+1) - A(J)}{y(J+1) - y(J)} \quad \text{atau} \quad \frac{\partial A}{\partial y} = \frac{A(J) - A(J-1)}{y(J) - y(J-1)} \quad \text{atau} \quad \frac{\partial A}{\partial y} = \frac{A(J+1) - A(J-1)}{y(J+1) - y(J-1)} \quad (15)$$

sedangkan

$$\frac{\partial^2 A}{\partial x^2} = \left(\frac{2}{x(I+1) - x(I-1)} \right) \left[\frac{A(I+1) - A(I)}{x(I+1) - x(I)} - \frac{A(I) - A(I-1)}{x(I) - x(I-1)} \right] \quad (16)$$

dan

$$\frac{\partial^2 A}{\partial y^2} = \left(\frac{2}{y(J+1) - y(J-1)} \right) \left[\frac{A(J+1) - A(J)}{y(J+1) - y(J)} - \frac{A(J) - A(J-1)}{y(J) - y(J-1)} \right] \quad (17)$$

Sebagai syarat batas daerah analisis diambil harga potensial nol pada seluruh sisinya, suatu pendekatan yang cukup logis mengingat relatif jauhnya sumber arus dari sisi batas. Untuk perbatasan antara dua daerah berbeda, berlaku syarat batas seperti yang diberikan pada persamaan (12) dengan mengganti rapat fluksi B dengan vektor potensial magnet A sesuai persamaan (10).

Program disusun dalam bahasa Matlab^[4] mengingat kepraktisannya karena banyaknya fungsi-fungsi matematik (determinan matrik, fungsi gradien, dsb.) yang bisa menyederhanakan algoritma pemrograman dan kemampuannya untuk menampilkan gambar-gambar medan potensial maupun vektor kuat medan magnet dengan mudah.

2.4. Tahapan analisis

Sebagai langkah awal adalah melakukan analisis pada kondisi tanpa atap (terbuka). Pengaruh beberapa parameter terhadap intensitas medan magnet di permukaan tanah bisa dipelajari seperti pengaruh permeabilitas tanah dan pengaruh sudut fasa arus. Pada Tabel 1 diberikan harga-harga masukan untuk analisis medan magnet di permukaan tanah pada kondisi tanpa perisai. Selanjutnya, dengan adanya atap pelat besi sebagai perisai medan magnet, dipelajari pengaruh dari 4 variabel utama, yaitu ketebalan pelat, permeabilitas magnetik pelat besi, ketinggian pelat dan lebar pelat. Harga-harga masukan untuk analisis medan magnet di permukaan tanah dengan adanya atap besi diberikan pada Tabel 2.

Tabel 1. Tahapan analisis pengaruh permeabilitas tanah dan sudut fasa terhadap medan magnet di atas permukaan tanah pada kondisi tanpa perisai

Tujuan analisis	Permeabilitas relatif tanah	Sudut fasa arus (fasa R)	Arus R (Amp)	Arus S (Amp)	Arus T (Amp)
Mengetahui pengaruh permeabilitas tanah	1-2-3-4-5-10	120	-1250	2500	-1250
Mengetahui pengaruh sudut fasa arus	1	0	2500	-1250	-1250
		30	2165	0	-2165
		60	1250	1250	-2500
		90	0	2165	-2165
		120	-1250	2500	-1250
		150	-2165	2165	0
		180	-2500	1250	1250

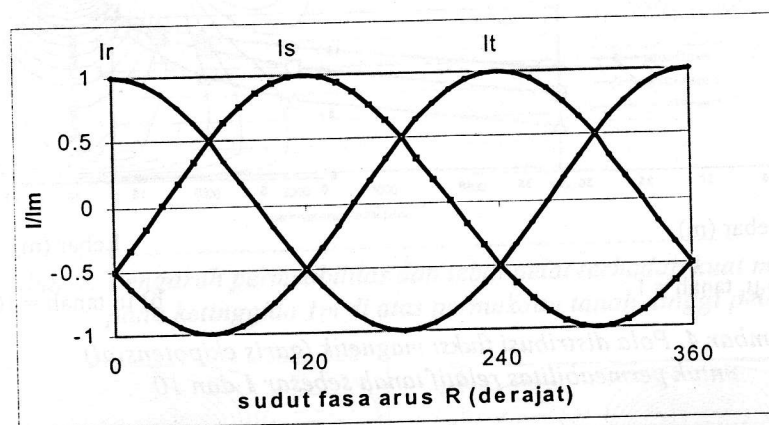
Tabel 2. Tahapan analisis pengaruh permeabilitas, tebal, lebar dan ketinggian atap pelat besi terhadap medan magnet di permukaan tanah (sudut fasa $R=120^\circ$)

Tujuan analisis	Tinggi (m)	Lebar (m)	Tebal (mm)	Permeabilitas relatif
Mengetahui pengaruh tebal dan permeabilitas	10	40	1	1-100-500-1000-2000-5000
	10	40	2	1-100-500-1000-2000-5000
	10	40	5	1-100-500-1000-2000-5000
Mengetahui pengaruh tinggi dan lebar pelat	5	0-2-6-10-16-20-30-40	2	2000
	10	0-2-6-10-16-20-30-40	2	2000
	15	0-2-6-10-16-20-30-40	2	2000

3. Hasil dan Pembahasan

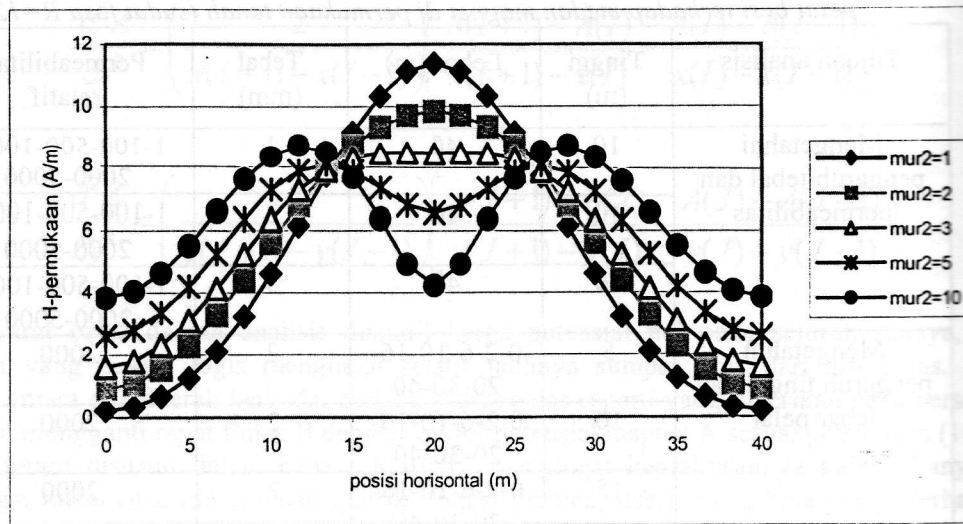
3.1. Karakteristik tanpa perisai

Analisis pada kondisi tanpa perisai dilakukan untuk mengetahui pengaruh dari permeabilitas tanah dan juga pengaruh dari perubahan sudut fasa arus yang merupakan arus bolak-balik sinusoidal. Gambar gelombang arus dari ketiga fasa R-S-T diberikan pada Gambar 2^[5].

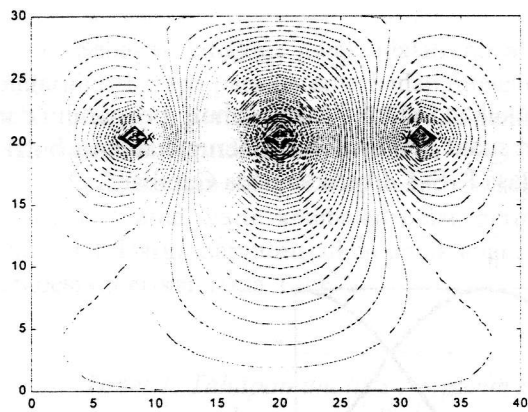


Gambar 2. Gelombang arus dalam sistem tiga fasa

Pengaruh dari permeabilitas magnetik dari tanah terhadap kuat medan magnet di ketinggian ± 1 m di atas permukaan tanah diberikan pada Gambar 3. Dari gambar tersebut terlihat bahwa pengaruh dari permeabilitas tanah cukup signifikan terhadap kuat medan magnet di atas permukaan. Harga puncak dari kuat medan, yaitu di posisi tengah, terlihat menurun dengan bertambahnya permeabilitas tanah, tetapi pada daerah lebih ke pinggir, kuat medan justru meningkat dengan bertambahnya permeabilitas tanah. Pada Gambar 4 ditunjukkan garis-garis ekuipotensial magnetik yang juga merupakan garis-garis fluksi magnet. Dengan tingginya permeabilitas magnetik tanah, semakin mudah fluksi magnet melaluinya, sehingga sebagian dari garis-garis fluksi seperti tersedot ke tanah, masuk melalui daerah pinggir. Hal inilah yang menaikkan kuat medan magnet di daerah pinggir dengan bertambahnya permeabilitas magnetik tanah tersebut.

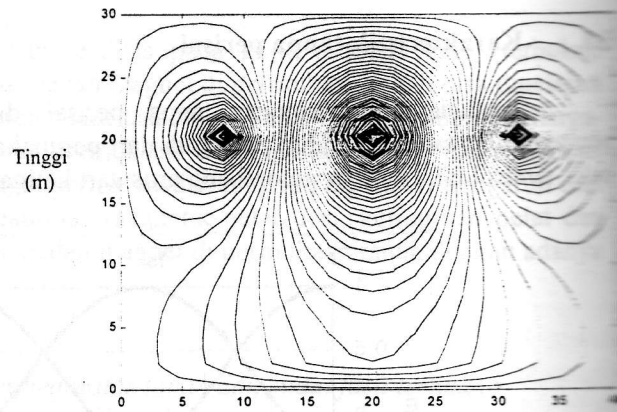


Gambar 3. Pengaruh permeabilitas tanah terhadap kuat medan magnet pada ketinggian 1m di atas permukaan tanah ($\mu_r = \mu_{r\text{-tanah}}$)



Lebar (m)

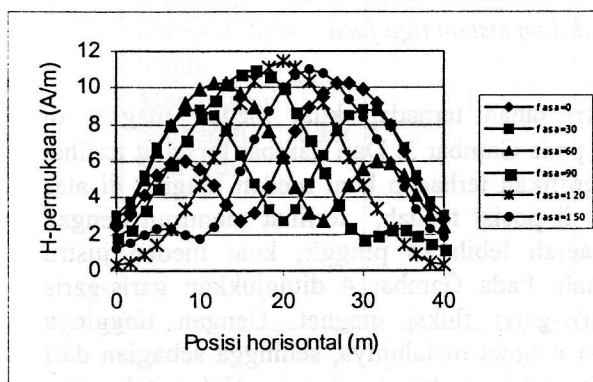
a) μ_r tanah = 1



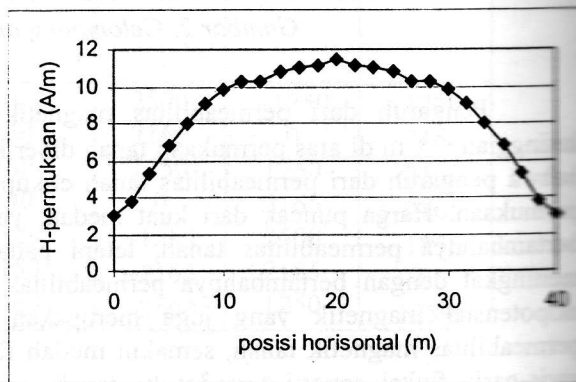
Lebar (m)

b) μ_r tanah = 10

Gambar 4. Pola distribusi fluksi magnetik (garis ekipotensial) untuk permeabilitas relatif tanah sebesar 1 dan 10



Gambar 5. Distribusi kuat medan magnet untuk berbagai sudut fasa arus R

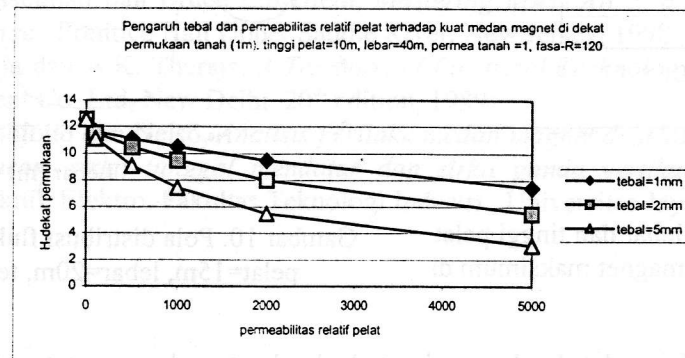


Gambar 6. Distribusi kuat medan magnet maksimum sebagai fungsi posisi

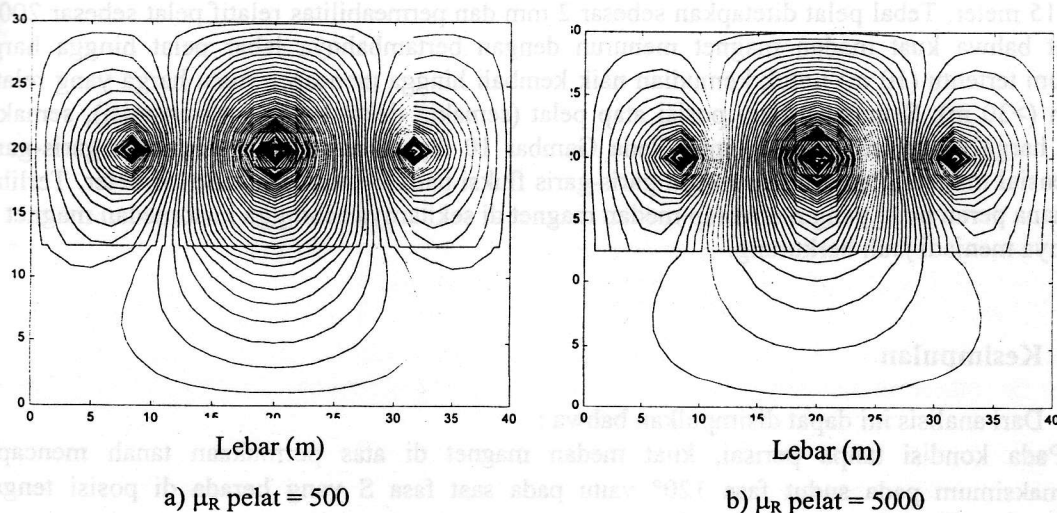
Karena saluran transmisi merupakan sistem 3 fasa, maka medan magnet di permukaan tanah merupakan penjumlahan vektor dari medan magnet yang disebabkan oleh masing-masing arus fasa^[6]. Karena arus tersebut merupakan arus bolak-balik dengan frekuensi tertentu (50 Hz), maka kuat medan magnet yang dihasilkan juga merupakan besaran bolak-balik dengan frekuensi yang sama. Gambar 5 menunjukkan pola distribusi kuat medan magnet di atas permukaan tanah untuk beberapa sudut fasa R yang berbeda. Sedangkan Gambar 6 menunjukkan kurva harga maksimum dari kuat medan pada setiap posisi horisontal. Terlihat bahwa pada saat sudut fasa R sebesar 120° , yang berarti arus fasa S mencapai harga puncak dan arus fasa R dan T mempunyai harga sebesar setengah dari harga puncak dengan arah yang berlawanan dengan arus fasa S, maka pola kuat medan magnet di atas permukaan tanah mempunyai harga puncak yang tertinggi dibanding pada sudut fasa yang lain, dan harga puncak tersebut berada pada posisi tengah.

3.2 Karakteristik dengan perisai

Ada 4 parameter perisai yang ingin dipelajari pengaruhnya terhadap kuat medan magnet di atas permukaan tanah, yaitu: tebal pelat perisai (TP), permeabilitas magnetik dari bahan pelat (μ_p), ketinggian atap/pelat, dan lebar pelat. Dalam mempelajari pengaruh dari salah satu parameter, parameter lain ditetapkan konstan. Ada 2 parameter selain empat parameter di atas yang dibuat tetap dalam seluruh analisis, yaitu sudut fasa R yang diambil tetap sebesar 120° dan permeabilitas relatif tanah yang ditetapkan sebesar satu. Pengambilan kedua harga tersebut lebih didasarkan pada alasan untuk mendapatkan hasil analisis yang lebih konservatif karena telah diketahui melalui analisis tanpa perisai, bahwa dengan sudut fasa 120° dan permeabilitas relatif tanah sebesar 1, kuat medan magnet di permukaan tanah mencapai harga maksimum.

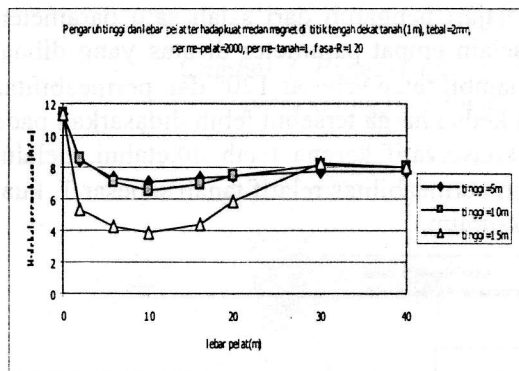


Gambar 7. Pengaruh permeabilitas dan tebal pelat terhadap kuat medan magnet pada ketinggian 1m di atas permukaan tanah, tinggi pelat=10m,

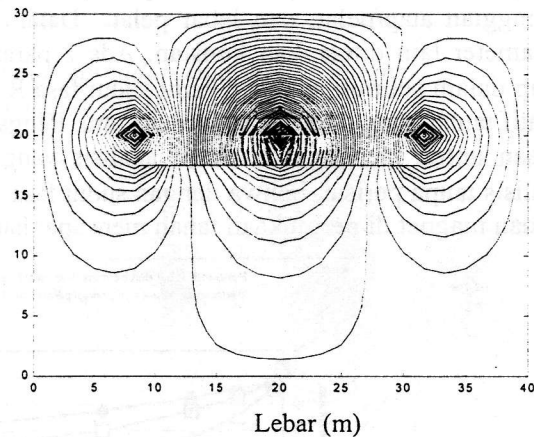


Gambar 8. Pengaruh permeabilitas pelat pada pola distribusi fluksi magnetik (garis ekipotensial) untuk tinggi pelat=10m, lebar=40m, tebal=2mm

Pada Gambar 7 diberikan pengaruh dari permeabilitas magnetik atap pelat besi terhadap kuat medan magnet di atas permukaan tanah (pada ketinggian 1,07m dari tanah) untuk 3 macam ketebalan pelat, yaitu: 1 mm, 2 mm dan 5 mm. Harga permeabilitas relatif pelat yang diambil sebagai variabel sesuai dengan Tabel 2, yaitu: 1, 100, 500, 1000, 2000 dan 5000. Permeabilitas relatif sebesar 1 identik dengan keadaan tanpa pelat karena berarti sama dengan permeabilitas udara. Ketinggian atap ditetapkan sebesar 10m dan lebar atap sebesar 40m atau selebar daerah analisis. Dari Gambar 7 terlihat bahwa kuat medan magnet maksimum di permukaan tanah menurun secara signifikan dengan bertambahnya permeabilitas pelat dan juga dengan ketebalan pelat. Sebagai ilustrasi, dengan permeabilitas relatif sebesar 5000, ketebalan pelat 1mm bisa menurunkan kuat medan magnet hingga 40% dan untuk tebal 2mm hingga 55% dan 5mm hingga 75%. Gambar 8 memperlihatkan garis-garis ekuipotensial magnetik (ekivalen dengan garis-garis fluksi magnet) pada 2 kondisi yang berbeda, yaitu dengan permeabilitas relatif 500 dan 5000, pada ketebalan 2mm. Terlihat bahwa garis-garis fluksi yang semula mencapai permukaan tanah pada kondisi tanpa pelat (Gambar 4-a) menjadi seperti terserap di pelat, sehingga yang sampai ke permukaan tanah berkurang secara signifikan. Penyerapan fluksi tersebut semakin besar dengan meningkatnya permeabilitas.



Gambar 9. Pengaruh lebar dan tinggi pelat terhadap kuat medan magnet maksimum di



Gambar 10. Pola distribusi fluksi pada tinggi pelat=15m, lebar=20m, tebal 2mm

Pengaruh dari lebar pelat dan ketinggian terhadap kuat medan magnet maksimum di atas permukaan tanah ditunjukkan pada Gambar 9 yang dianalisis untuk 8 harga variabel lebar pelat yaitu 0 m, 2 m, 6 m, 10 m, 16 m, 20 m, 30 m dan 40 meter, serta 3 harga ketinggian, yaitu 5 m, 10 m dan 15 meter. Tebal pelat ditetapkan sebesar 2 mm dan permeabilitas relatif pelat sebesar 2000. Terlihat bahwa kuat medan magnet menurun dengan bertambahnya lebar pelat hingga harga minimum tertentu (10 m) untuk kemudian naik kembali hingga mencapai suatu harga yang relatif konstan (>30 m). Semakin tinggi posisi atap pelat (semakin dekat ke kawat transmisi), semakin rendah harga minimum yang dicapai. Pada Gambar 10 diperlihatkan pola distribusi garis-garis ekuipotensial magnetik atau juga sebagai garis-garis fluksi pada ketinggian pelat 15 meter. Terlihat bagaimana peran pelat yang menyerap medan magnet di sekitarnya sehingga kuat medan magnet di bawahnya menjadi jauh berkurang.

4. Kesimpulan

Dari analisis ini dapat disimpulkan bahwa :

1. Pada kondisi tanpa perisai, kuat medan magnet di atas permukaan tanah mencapai maksimum pada sudut fasa 120° yaitu pada saat fasa S yang berada di posisi tengah mencapai maksimum.
2. Permeabilitas tanah juga mempengaruhi pola medan magnet di atas permukaan tanah, dimana semakin tinggi permeabilitas magnet, pola kuat medan di permukaan tanah

cenderung lebih menyebar dengan kuat medan di tengah semakin rendah dan di pinggir semakin tinggi.

3. Ketebalan pelat dan permeabilitas magnetnya mempunyai pengaruh yang sama terhadap kuat medan magnet di bawahnya, yaitu semakin tinggi harganya, semakin rendah kuat medan di atas permukaan tanah. Sebagai ilustrasi, dengan permeabilitas relatif pelat sebesar 5000, telah mampu menurunkan intensitas medan magnet di permukaan tanah sebesar 40% untuk ketebalan 1mm, 55% untuk 2mm dan 75% untuk tebal 5mm. Sedangkan untuk permeabilitas relatif pelat sebesar 2000, harga-harga di atas berkurang menjadi 25% untuk 1mm, 36% untuk 2mm dan 58% untuk 5mm.
4. Dengan semakin lebar atap pelat yang digunakan, kuat medan magnet di atas permukaan tanah menurun sampai suatu harga minimum tertentu (10m) dimana kemudian akan naik kembali hingga mencapai harga relatif konstan pada lebar pelat tertentu (>30m). Semakin tinggi pelat atau semakin dekat ke kawat fasa, turunnya kuat medan magnet di permukaan tanah semakin besar, tetapi untuk lebar pelat di atas harga tertentu tersebut, pengaruh perbedaan ketinggian relatif kecil.

5. Daftar Pustaka

- [1] William H. Hayt, Jr., *Engineering electromagnetics*, McGraw-Hill International Editions, 1989.
- [2] John D. Kraus, *Electromanetics*, McGraw-Hill International Editions, 1991.
- [3] T. Basaruddin, *Metoda Beda Hingga*, Penerbit PT. Elex Media Komputindo, kerjasama Gramedia dan Pusat Antar Universitas Ilmu Komputer Universitas Indonesia, 1994.
- [4] Duane Hanselman dan Bruce Littlefield, *Mastering MATLAB 5, a comprehensive tutorial and reference*, Prentice Hall Upper Saddle River, New Jersey, 1998.
- [5] B.L. Theraja dan A.K. Theraja, *A Tex-book of Electrical Technology*, Nirja Construction & Development Co. Ltd, New Delhi, 20th edition, 1989.
- [6] Hendro Tjahjono dan Nelso, *Analisis perilaku medan magnet di sekitar kawat transmisi 500 kV konfigurasi sirkit tunggal mendatar dan sirkit ganda vertikal*, seminar tugas akhir Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Jayabaya, 2001.